

Experimentelle Untersuchung der
Bewegungsunschärfe
bei Röntgenaufnahmen unter
praxisnahen Bedingungen

von

HEINZ SIEBER



Aus der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen
Direktor: Prof. Dr. med. N. Henning

Experimentelle Untersuchung der Bewegungsunschärfe
bei Röntgenaufnahmen unter praxisnahen Bedingungen.

Inaugural - Dissertation
zur
Erlangung der Doktorwürde
der
Hohen Medizinischen Fakultät
der
Friedrich - Alexander - Universität
zu
Erlangen



Vorgelegt von
Heinz Sieber
aus Warnsdorf

Dekan: Professor Dr. F. Heim
Referent: Professor Dr. N. Henning
Tag der mündlichen Prüfung: 7.7.1959

MEINEN ELTERN GEWIDMET



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Einleitung	1 - 7
II. Aufgabenstellung	7
III. Versuchsanordnung	7 - 19
IV. Ergebnisse	19 - 21
V. Diskussion	21 - 24
VI. Zusammenfassung	24 - 25
VII. Literatur	26 - 27

I. Einleitung.

Die Unschärfe einer Röntgenaufnahme ist durch Faktoren bedingt, die sich nicht oder nur teilweise ausschalten lassen. Diese Faktoren sind: die geometrische Unschärfe, abhängig von der Größe des Brennfleckes und den Abstandsverhältnissen, die Materialunschärfe, bedingt durch Verstärkerfolien und Filmmaterial, und schließlich die Bewegungsunschärfe, durch Bewegung des Objektes oder des Gerätes während der Belichtungszeit hervorgerufen.

Die geometrische Unschärfe hat Bronkhorst¹⁾ experimentell erforscht und mathematisch erfaßt. Sie läßt sich in der Gleichung ausdrücken:

$$U_g = f \frac{a}{b} \quad 1$$

wobei f die Größe des Brennfleckes der Röntgenröhre, a der Abstand von Film und Objekt und b der Abstand von Fokus und Objekt ist.

Zu seinen Versuchen verwendete Bronkhorst Metalldrahtnetze, die er zur Bestimmung der Schärfe für besonders zweckmäßig hielt, weil es "dieser vollkommen bekannte, regelmäßige Gegenstand ermöglicht, in seinem Abbild alle Eigenheiten der Bildgestaltung unmittelbar und sicher zu erkennen." Die Aufnahmen machte er mit einem "Lichtfokus", einem Lichtkasten mit einer Glühlampe hinter einer Milchglasscheibe, gegen die eine dünne Metallblende flach angelegt werden konnte. So gelang es ihm, jede Brennfleckgröße in genauer Abmessung zu erhalten. Durch die Auswertung der mit dieser Versuchsanordnung erlangten Aufnahmen bewies er die mathematisch abgeleitete Formel für die geometrische Unschärfe. Auch andere Autoren, Klasens²⁾, Morgan³⁾

bestätigen die Richtigkeit dieser Formel.

Die Materialunschärfe läßt sich in zwei Komponenten teilen. Der eine Teil, die Filmunschärfe, kommt durch das Korn des Filmes zustande. Sind die Bromsilberteilchen in der Filmschicht groß, so hat dieser zwar eine hohe Empfindlichkeit, aber auch eine hohe Unschärfe. Frost⁴⁾ untersuchte die Abhängigkeit der Filmunschärfe von der Strahlenqualität für grob- und feinkörnige Filme. Es zeigte sich bei allen Filmtypen eine deutliche Abhängigkeit der inneren Unschärfe des Filmmaterials von der Aufnahmespannung, aber beim grobkörnigen Film stieg die Unschärfe mit zunehmender Röhrenspannung sehr viel steiler an als beim feinkörnigen Film. Nach Warren⁵⁾ ist allerdings die Filmunschärfe gegenüber den anderen Unschärfefaktoren so gering, daß sie in diesem Zusammenhang keine Bedeutung besitzt.

Der andere Teil der Materialunschärfe wird durch die Verstärkerfolien erzeugt. Diese durch sie hervorgerufene Unschärfe trägt einen beträchtlichen Teil zur gesamten Unschärfe einer Röntgenaufnahme bei. Dem Nachteil der Vergrößerung der Unschärfe eines mit Verstärkerfolien aufgenommenen Röntgenbildes steht der Vorteil der Verkürzung der Belichtungszeit auf etwa $1/10$ des Wertes ohne Folien gegenüber. Dieser Eigenschaft verdankt die Folie ihre Bedeutung.

Wegen der großen Wichtigkeit der Verstärkerfolien für die Röntgenologie haben sich viele Autoren mit der Ergründung der durch Folien erzeugten Unschärfe befaßt. In der Literatur werden vier verschiedene Eigenschaften beschrieben, welche die Unschärfe der Folien bedingen:

- 1.) die Dicke der Leuchtschicht.
- 2.) die Größe und Art der einzelnen Fluoreszenz-kristalle.

3.) die Häufung und Anordnung der Kristalle in der Einbettungsmasse.

4.) Art und Reflexionseigenschaften der Folienunterlage.

Viele Autoren, Bauer⁶⁾, Eggert⁷⁾, Meidinger⁸⁾, sehen die Korngröße der Leuchtsubstanz als die Ursache der verringerten Zeichenschärfe an. Angeregt durch Frantzell⁹⁾ machten Schober und Klett¹⁰⁾ mit den verschiedenen handelsüblichen Folien Mikroaufnahmen und fanden, daß aller Wahrscheinlichkeit nach die Folienunschärfe nicht durch die Korngröße, sondern durch die Art der Unterlage und die Einbettungssubstanz und hauptsächlich durch die Dicke der Leuchtschicht bedingt ist. In einer weiteren Arbeit fanden dann Schober und Klett¹¹⁾, daß es zur Beurteilung der Qualität einer Folie nötig ist, außer der Zeichenschärfe den Verstärkungsfaktor, die zeitliche Unveränderlichkeit von Zeichenschärfe und Verstärkungsfaktor und die Gleichmäßigkeit in der Herstellung zu beachten. Einen Weg zur Bestimmung des Verstärkungsfaktors zeigt Frommhold¹²⁾ in seiner Arbeit über Messungen über die Helligkeit von Verstärkerfolien.

Auch Pfahnl¹³⁾ befaßte sich mit der subjektiven und objektiven Messung der Folienunschärfe. Er fand, daß die Methode der Untersuchung der Kontrastverminderung, die durch die Folienunschärfe bedingt ist, am geeignetsten zur Prüfung des Unschärfebeitrags der Folie sei. Es wurde ein Strichgitter (30 Linien/cm) mit Röntgenstrahlen aufgenommen und die Aufnahmen mit einem Mikrophotometer ausgewertet. Die Versuche ergaben, daß bei CaWO_4 -Folienpaaren mit steigender Schichtdicke die Schwärzung immer durch ein Maximum geht, während der Detailkontrast stetig abnimmt, oder höchstens konstant bleibt. Weiter zeigte sich, daß die Vermin-

derung des Detailkontrastes bei der Verwendung der Bariumsulfat-Folien kleiner ist, als der Gewinn an Schwärzung, was auf die Eigenschaften des Leuchtstoffes zurückzuführen ist, dessen Kontrastgebung geringer ist, als der des CaWO_4 .

Frost¹⁴⁾ befaßt sich ausführlich mit der Bildunschärfe der Verstärkerfolien. Er untersuchte zunächst auch die spannungsabhängige Folienunschärfe und fand, daß die CaWO_4 -Folie eine mit der Spannung ansteigende Unschärfe zeigt, die jedoch bei 70 KV ein stark ausgeprägtes Minimum besitzt. Dieses Unschärfeminimum tritt allerdings nur bei CaWO_4 -Folien auf und stellt eine stoffgebundene Eigenschaft dar. Ein Unschärfeanstieg wurde ferner mit zunehmender Vorfilterung der Strahlen beobachtet. Außerdem zeigt Frost den Einfluß des Verhältnisses der Flächenbelegung von Vorder- und Rückfolie auf die Zeichenschärfe von Folienkombinationen.

Nemet, Cox und Walker¹⁴⁾ fanden eine mathematische Funktion, die zu den experimentellen Ergebnissen sehr gut paßt und mit deren Hilfe es möglich ist, die Folienunschärfe als eine Konstante für bestimmte Folientypen auszudrücken.

Nach diesem kurzen Überblick über die über Folienunschärfe geleistete Arbeit nun zum dritten Hauptteil der Gesamtunschärfe, der Bewegungsunschärfe.

Warren⁵⁾ beschäftigt sich ausführlich mit der Bewegungsunschärfe bei Röntgenaufnahmen. Er geht von der Berechnung der Unschärfe eines sich mit konstanter Geschwindigkeit parallel zum Film bewegendes Objektes aus. Dabei findet er, daß sich die Gesamtunschärfe im allgemeinen von der arithmetischen Summe der Bewegungsunschärfe und der geometrischen Summe unterscheidet. Diese Ergebnisse

sucht er dann durch Phantommessungen zu beweisen. Bei seiner Apparatur wird ein für Röntgenstrahlen undurchlässiges Material mit konstanter Geschwindigkeit während der Belichtung mit Röntgenstrahlen bewegt. Die Kante dieses Objektes erzeugt dann während der Belichtung auf dem Film die Bewegungsunschärfe. Die Aufnahmen wurden ohne Verstärkerfolien gemacht, wie auch bei den Berechnungen die Folienunschärfe nicht berücksichtigt wird. Die mathematischen Berechnungen laufen darauf hinaus Formeln zu finden, die es ermöglichen, die Belichtung, vorausgesetzt, daß die Intensität der Röntgenstrahlen während der Belichtung konstant war, für jeden Punkt der Unschärfe zu berechnen. Diese Formeln werden in einer zweiten Arbeit von Warren¹⁵⁾ noch erweitert. In dieser Arbeit erscheint auch eine verbesserte Formel zur Berechnung der beobachteten Unschärfe. Allerdings ist auch in diesen Formeln, wie oben schon erwähnt, die Materialunschärfe nicht berücksichtigt. Schließlich erfolgt noch eine experimentelle und mathematische Untersuchung der Unschärfe eines sich bewegenden Objektes, wenn die Intensität der Röntgenstrahlen während der Belichtung nicht konstant bleibt.

Nemet, Cox und Walker¹⁴⁾ behandeln die Bewegungsunschärfe nur am Rande; sie führen wie alle anderen Autoren für die Errechnung der Bewegungsunschärfe folgende Formel an:

$$U_b = \frac{a + b}{b} vt \quad 2$$

wobei a und b die gleiche Bedeutung wie in Formel 1 haben, v die Geschwindigkeit des Objektes und t die Belichtungszeit bedeutet.

Auch Frost⁴⁾ befaßte sich mit der Bewegungsunschärfe; seine Untersuchungen beziehen sich auf Bewegungsverfälschungen, die durch das Nachleuchten

von Röntgenschirmen zustande kommen.

Burger¹⁶⁾ untersuchte den Einfluß der Bewegung des Objektes auf die Eigenschaften des Röntgenbildes mit dem Kontrast-Detail-Diagramm. Er benützte zur Erzeugung der Bewegungsunschärfe ein Phantom, das aus einer Lochplatte bestand, die durch ein Pendel bewegt werden konnte. Röntgenaufnahmen des sich bewegenden Phantoms ergeben das Kontrast-Detail-Diagramm. Aus diesem Diagramm war ersichtlich, daß bei einer Bewegungsunschärfe von mehr als 2 mm eine deutliche Verminderung der Wahrnehmbarkeit auftritt.

Schließlich haben sich noch einige Autoren mit der gesamten Unschärfe von Röntgenbildern beschäftigt. Hier war es vor allem Klasens²⁾, der die gesamte Unschärfe mathematisch zu erfassen suchte. Er fand, daß sich diese immer zwischen zwei Kurven befindet, welche durch die Gleichungen

$$U = \sqrt{U_g^2 + U_b^2 + U_f^2} \quad \text{und} \quad U = \sqrt[3]{U_g^3 + U_b^3 + U_f^3}$$

gegeben sind.

Nemet, Cox und Walker¹⁴⁾ beschäftigten sich mit der gleichen Aufgabe. Sie arbeiteten folgenden mathematischen Ausdruck für die gesamte Unschärfe eines Röntgenbildes aus:

$$U = U_b + \frac{1}{3} \frac{U_g^2}{U_b} + \frac{U_f^2}{2U_b} - \frac{U_f^3}{4U_b U_g} \sinh \frac{2U_g}{U_f} e^{-\frac{2U_b}{U_f}}$$

Diese Formel zeigt nach ihren Angaben eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

Morgan³⁾ zeigt schließlich, daß beim Vorhandensein von mehreren Unschärfefaktoren auf einem Röntgenbild die effektive Unschärfe gleich dem Wert der größten Unschärfe der einzelnen Faktoren ist. Diese Feststellung gilt nicht, wenn alle

Faktoren gleich groß sind. In diesem Falle steigt nämlich der effektive Unschärfewert kaum an. Demnach sollte nach Morgan die geometrische Unschärfe und die Bewegungsunschärfe dem Unschärfewert der Materialunschärfe angepaßt werden.

II. Aufgabenstellung.

Nachdem bisher das Problem der Bewegungsunschärfe vorwiegend von der rechnerischen Seite angegangen wurde, sollte diese Frage nun einmal rein experimentell angegangen werden. Da die Bewegungsunschärfe einer Röntgenaufnahme sehr stark von der Belichtungszeit abhängt und diese wieder von dem Verstärkungsfaktor der für diese Aufnahmen verwendeten Folienkombinationen, ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen Bewegungsunschärfe und Verstärkerfolie. Dieser soll experimentell untersucht werden. Die Untersuchung soll mit einem Phantom ausgeführt werden, mit dem man die Verhältnisse bei Magen aufnahmen mit 120 KV reproduzieren kann.

III. Versuchsanordnung.

1. Voruntersuchungen

a. Geschwindigkeiten am menschlichen Körper.

Nach Stumpf¹⁷⁾ beträgt die Geschwindigkeit der peristaltischen Wellen des Magens 5 mm/sec. Bei pathologischen Verhältnissen kann sich diese Zahl allerdings auf das Vierfache steigern. Starling¹⁸⁾ untersuchte die Geschwindigkeiten der peristaltischen Wellen am Darm und fand Werte von 20 bis 50 mm/sec. Beim Magen und auch beim Darm ist noch

zu beachten, daß diese Organe durch willkürliche Bewegungen der Bauchmuskulatur und des Zwerchfells mit erheblicher Geschwindigkeit verschoben werden können. Die Geschwindigkeit der Bewegung des Herzrandes gibt Stumpf getrennt nach Medial- und Lateralbewegung an. Bei der Medialbewegung gibt er Werte zwischen 20 und 60 mm/sec an, bei der Lateralbewegung 60 bis 100 mm/sec. Die mittlere Strömungsgeschwindigkeit des Blutes in der Aorta beträgt nach Tigerstedt¹⁹⁾ 100 bis 200 mm/sec, in Kapillaren 0,5 bis 1,0 mm/sec. Fleisch²⁰⁾ gibt die Strömungsgeschwindigkeit in den Kapillaren ebenfalls mit 0,25 bis 1,0 mm/sec an. Bethe und Bergmann²¹⁾ geben in ihrem Handbuch der Physiologie die Pulswellengeschwindigkeit bei ruhigem Atmen mit durchschnittlich 8300 mm/sec und bei starkem Pressen mit 7300 mm/sec an. Diesen Werten stimmen Weitz und Hartmann²²⁾ mit der Angabe von 7500 mm/sec für die Pulswellengeschwindigkeit zu. Sie stellten außerdem 14500 mm/sec als höchste und 4600 mm/sec als geringste Pulswellengeschwindigkeit fest. Schließlich wären noch Bewegungen zu erwähnen, die durch die aktive Bewegung eines Organs eine passive eines anderen hervorrufen, wie zum Beispiel die dem Ösophagus mitgeteilte Herzbewegung.

b. Größe und Kontrast des Objektes.

Um ein geeignetes Objekt zu finden, wurde ein Röntgenbild des Magens untersucht. Es war eine gut belichtete Aufnahme mit einer Grundschwärzung $S = 1,3$ bis $1,4$ mit Kontrastmittelfüllung zur Darstellung des Magenfeinreliefs. Die Ausmessung eines Sulcus gastricus dieser Aufnahme zeigte eine Breite von 0,6 mm und die photometrische Ausmessung der Kontrastmittelfüllung des Sulcus einen Schwärzungskontrast von 0,1. Diesen beiden Werten sollte

nun das Objekt entsprechen. Hier schien ein Draht gut geeignet zu sein, zumal er gegenüber den viel verwendeten Kantenaufnahmen den Vorteil hat, daß er bei nicht ganz exakt zentriertem Zentralstrahl keine erhöhte Unschärfe liefert. Probeaufnahmen mit Drähten von 0,6 mm Durchmesser aus verschiedenem Material ergaben, nachdem sie ebenfalls photometriert worden waren, daß der Kontrast eines 0,6 mm dicken Stahldrahtes dem eines Sulcus gastricus entspricht.

2. Phantom.

Um bei der Untersuchung der Bewegungsunschärfe möglichst praxisnahe Bedingungen einzuhalten, mußte ein Phantom konstruiert werden, das den Bedingungen bei klinischen Röntgenaufnahmen entspricht. So wurde dieser Stahldraht, wie Abbildung 1 zeigt, als Objekt auf einen Holzkasten über einer

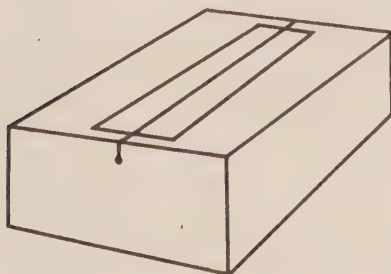


Abb. 1

Das Objekt ist auf den Holzkasten über der Plexiglasplatte aufgespannt.

eingelassenen Plexiglasplatte aufgespannt. Der Einfachheit halber sollte nun zur Erzeugung der Bewegung nicht das Objekt, sondern die Kassette mit dem Film bewegt werden. Dies geschah mit einem auf vier Geschwindigkeiten regelbaren Schallplattenmotor. Dieser war mit einem Plattenteller verbunden, auf den die Kassette mit dem Film zu liegen

kam und eine Drehbewegung ausführte. Das Ganze konnte durch eine Öffnung des Holzkastens unter das Objekt geschoben werden. Der Gleichlauf des Motors war durch Fliehkraftregler gesichert und wurde außerdem mit Hilfe einer Stoppuhr kontrolliert. Weiter wurde noch eine Marke genau im Drehpunkt des Tellers befestigt, mit deren Hilfe es möglich war, nachträglich auf jeder Röntgenaufnahme festzustellen, ob der Zentralstrahl der Röhre genau auf das Objekt eingestellt war. Durch diese Art der Bewegungserzeugung war erreicht worden, daß jeder Punkt des Objektes auf der Röntgenaufnahme eine andere Winkelgeschwindigkeit besitzt. Damit war ein großer Vorteil erreicht: auf einem einzigen Film waren alle interessanten Objektgeschwindigkeiten vorhanden.

Um die Streuung der Röntgenstrahlen den Gegebenheiten bei klinischen Röntgenaufnahmen anzupassen, wurde in den Strahlengang zwischen Röntgenröhre und Objekt ein Kunststoffbehälter mit einer 20 cm hohen Wassersäule eingeschaltet. Damit entsprechen die anwendbaren Belichtungszeiten den in der Praxis vorkommenden Werten, die für normal starke Patienten bei 120 KV zwischen 0,01 und 0,02 sec liegen. Abbildung 2 zeigt eine schematische Skizze der beschriebenen Versuchsanordnung.

3. Röntgeneinrichtung.

a. Apparat.

Die Aufnahmen wurden mit dem Sechs-Ventil-Apparat Tridoros 3 der Siemens-Reiniger-Werke AG Erlangen gemacht. Die Belichtungszeiten wurden vor Beginn der Aufnahmen oszillographisch geprüft und für richtig befunden.

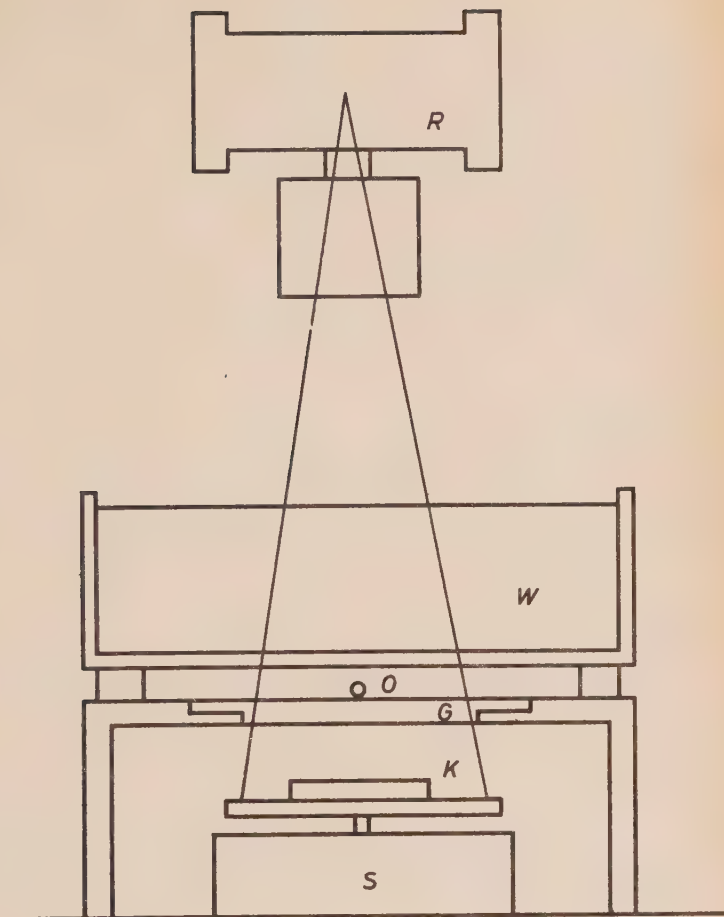


Abbildung 2.

R = Röntgenröhre mit Tiefenblende.

W = Kunststoffbehälter mit Wassersäule.

O = Objekt.

G = Plexiglasplatte.

K = Kassette mit Film und Verstärkerfolien.

S = Schallplattenmotor mit Teller.

b. Röhre.

Als Röhre kam eine P 125/30/50 ö der Siemens-Reiniger-Werke AG Erlangen in Verwendung. Die Röhre war mit einer Tiefenblende versehen. Die Eigenfiltration der Röhre kommt ungefähr 2 mm Al gleich. Die Größe des verwendeten Brennfleckes war für alle Aufnahmen 2 mm².

c. Aufnahmematerial.

Als Filmmaterial diente der Kodak Regulix Film.

d. Folien.

Sämtliche Röntgenaufnahmen wurden mit drei Folienpaaren von Siemens-Reiniger gemacht: Rubin (feinzeichnend), Saphir (universal), Diamant (hochverstärkend).

e. Kassette.

Handelsübliche Kassette 13/18 der Siemens-Reiniger-Werke mit Al-Vorderwand und Bleirückwand.

f. Entwicklung.

Die Filme wurden in Adefo-Röntgenentwickler unter ungleichmäßigen Bewegungen 6 Minuten bei 20° C entwickelt.

4. Aufnahmebedingungen.

Durch die Konstruktion des Phantoms war der Abstand Objekt-Film festgelegt. Er betrug 14,3 cm und hatte damit einen Wert, der dem von 15 cm bei Magen-aufnahmen am Durchleuchtungsgerät sehr nahe kommt. Der Fokus-Film-Abstand wurde mit 70 cm festgelegt, einem Wert, wie er ebenfalls bei Magen-aufnahmen am Durchleuchtungsgerät üblich ist. Schließlich war, wie oben erwähnt, der Brennfleck der Rönt-

genröhre 2 mm^2 . Damit ergab sich nach Formel 1

$U_g = f \frac{a}{b}$ für die Aufnahmen eine geometrische Unschärfe von $U_g = 2 \frac{143}{557}$; $U_g = 0,52 \text{ mm}$.

Die Untersuchungen sollten aber auch die Brennfleckgrößen von $1,2$ und $0,9 \text{ mm}^2$ beziehungsweise deren geometrische Unschärfe erfassen. Dies ließ sich dadurch erreichen, daß bei Benutzung des 2 mm^2 Fokus der Fokus-Objekt-Abstand verändert wurde. Der erforderliche Fokus-Objekt-Abstand wurde folgendermaßen berechnet:

Umrechnung für den $1,2 \text{ mm}^2$ Fokus:

$U_g = 1,2 \frac{143}{557}$; $U_g = 0,31 \text{ mm}$. Der Fokus-Film-Abstand berechnet sich damit ebenfalls aus Formel 1

$b = \frac{f}{U_g} a$; $b = \frac{2 \cdot 143}{0,32}$; $b = 89,4 \text{ cm}$.

Der Fokus-Film-Abstand ist also Film-Objekt-Abstand + Objekt-Film-Abstand.

Fokus-Film-Abstand = $89,4 + 14,3 = 103,7 \text{ cm}$.

Der Fokus-Film-Abstand beim 2 mm^2 Fokus muß $103,7 \text{ cm}$ betragen, um eine geometrische Unschärfe von $0,31 \text{ mm}$ zu erzeugen.

In der gleichen Art errechnet sich die geometrische Unschärfe für einen $0,9 \text{ mm}^2$ Fokus mit $0,234 \text{ mm}$. Die Umrechnung dieser auf einen 2 mm^2 Fokus ergibt einen Fokus-Film-Abstand von $136,5 \text{ cm}$.

Schließlich war noch die Geschwindigkeit des Plattentellers festzulegen. Um bei der Auswertung von extrem ungünstigen Bedingungen auszugehen, sollte sie bei einer Geschwindigkeit von 50 mm/sec erfolgen. Um diese Winkelgeschwindigkeit des Objektes bei den gebräuchlichen Belichtungszeiten auf dem Film abzubilden, erschien die Geschwindigkeit des Plattentellers von $19,2$ Umdrehungen pro Minute gut geeignet. Sie wurde dann auch ausschließlich verwendet.

5. Spezielle Aufnahmebedingungen.

Es wurden mit den Folienkombinationen Rubin, Saphir und Diamant je drei Aufnahmen mit einem Fokus-Film-Abstand von 70 cm, 103,7 cm und 136,5 cm gemacht. Eine Filterung erfolgte nur durch die Eigenfilterung der Röhre. Die Spannung war bei allen Aufnahmen 120 KV. Mit der Tiefenblende der Röhre wurde ein Feld von 20 cm² ausgeblendet. Das mAs-Produkt wurde auf eine Grundschwärzung $S = 1$ bis 1.3 je nach dem berechneten Fokus-Film-Abstand und den erforderlichen Zeitstufen eingestellt. Abbildung 3 zeigt die Skizze einer derartigen Aufnahme. Das dunkel gezeichnete Dreieck stellt den vom Objekt während der Belichtungszeit bestrichenen Raum dar. Der Drehpunkt ist durch das Loch in dem unteren Dreieck gekennzeichnet, welches auch zur Zentrierung des Zentralstrahls dient. Es ist daraus ersichtlich, wie durch die Bewegung während der Belichtung mit zunehmendem Abstand vom Drehpunkt die Bewegungsunschärfe zunehmen muß.



Abbildung 3.

Die Abbildung stellt die Skizze einer Röntgenaufnahme vom bewegten Objekt dar.

6. Einrichtung zur Auswertung der Aufnahmen.

Die nach der oben beschriebenen Weise erhaltenen Röntgenaufnahmen wurden mit dem Schnellphotometer 2 der Optischen Werke Jena ausgewertet. Zur Registrierung war an das Photometer ein lichtelektrischer Verstärker von Siemens und Halske AG

München und ein Stromschreiber der gleichen Firma angeschlossen. Am Photometer war bei allen Messungen eine Spaltbreite von 60μ und eine Spalthöhe von 0,27 mm eingestellt.

7. Auswertung.

Die Geschwindigkeit der peristaltischen Wellen am Magen-Darmkanal beträgt bis maximal 50 mm/sec. (siehe Seite 7). Um hier gleich von ungünstigen Bedingungen in Bezug auf die Bewegungsunschärfe auszugehen, wurden alle Aufnahmen bei einer Objektgeschwindigkeit von 50 mm/sec bei einer Belichtungszeit von 0,01 sec registriert. Es ist allerdings zu beachten, daß vierfach längere Belichtungszeiten noch im Bereich des Üblichen liegen. Um später einen Vergleich zwischen den einzelnen Folien anstellen zu können, war es notwendig, bei der gleichen Objektgeschwindigkeit noch andere Belichtungszeiten zu registrieren. Da als Verhältnis der Belichtung für die einzelnen Folien gelten kann: Rubin = 2, Saphir = 1, Diamant = 0,5, wurden die Belichtungszeiten von 0,005 0,01 und 0,02 sec für die Registrierung festgelegt. Damit ergab sich folgende Möglichkeit der späteren vergleichenden Auswertung:

Rubin	0,005	0,01	0,02
Saphir	0,005	0,01	0,02
Diamant	0,005	0,01	0,02

Somit blieb nur noch übrig, die der Belichtungszeit entsprechenden Punkte auf den Filmen festzulegen. Hierfür war folgende Umrechnung notwendig:

Die Umdrehungszahl des Plattentellers betrug 19,2 Umdrehungen pro Minute = 0,32 Umdrehungen pro Sekunde. Es soll nun der Punkt festgelegt werden, in dem eine Geschwindigkeit von 50 mm/sec bei der interessierenden Belichtungszeit herrscht. Die Umdrehungszahl ist $n = \frac{v}{2\pi r}$, wobei v die Geschwindigkeit des Objektes und r der Abstand vom Drehpunkt ist; daraus ergibt sich $r = \frac{v}{2n\pi}$; $r = \frac{50}{2 \cdot 0,32 \pi}$; $r = 2,5$ cm.

2,5 cm vom Drehpunkt des Tellers entfernt herrscht eine Geschwindigkeit von 50 mm/sec.

Hat nun eine Aufnahme die Originalbelichtungszeit von 0,007 sec, so hat ein 2,5 cm vom Drehpunkt entfernter Punkt die Geschwindigkeit 50 mm/sec bei einer Belichtungszeit von 0,007 sec, oder ein 5 cm vom Drehpunkt entfernter Punkt die Geschwindigkeit 50 mm/sec bei einer Belichtungszeit von 0,014 sec, oder dieser selbe Punkt hat eine Geschwindigkeit von 100 mm/sec bei 0,007 sec Belichtungszeit. Siehe Abbildung 4. So kann zu jeder Geschwindigkeit jede beliebige Belichtungszeit ganz unabhängig von der Originalbelichtungszeit berechnet werden.

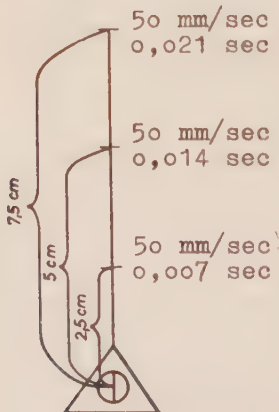


Abbildung 4.

Es ist ersichtlich, wie sich für eine bestimmte Objektgeschwindigkeit jede beliebige Belichtungszeit berechnen lässt.

Berechnung:

Die Geschwindigkeit soll 50 mm/sec betragen, die Originalbelichtungszeit des Films war 0,007 sec. Es soll der Abstand vom Drehpunkt bei 50 mm/sec für eine Belichtungszeit von 0,01 sec berechnet werden.

$$2,5 \text{ cm} : 0,007 \text{ sec} = x \text{ cm} : 0,01 \text{ sec};$$

$$x = \frac{2,5 \cdot 0,01}{0,007}; \quad x = 3,57 \text{ cm}.$$

3,57 cm vom Drehpunkt entfernt hat das Objekt eine Geschwindigkeit von 50 mm/sec bei 0,01 sec Belichtungszeit.

In dieser Art wurden, wie bereits weiter oben erwähnt, auf den Filmen die Punkte mit einer Geschwindigkeit von 50 mm/sec und einer Belichtungszeit von 0,005, 0,01 und 0,02 sec festgelegt. An diesen Punkten erfolgte dann die photometrische Auswertung.

Da das Objekt bei diesen Phantommessungen den gleichen Kontrast wie ein Sulcus gastricus bei Darstellung des Feinreliefs erzeugen sollte, war der Kontrast der Filme nicht sehr groß, zumal er in den weiter vom Drehpunkt entfernten Gebieten noch durch die Bewegungsunschärfe verkleinert wurde. Aus diesem Grunde ging natürlich das Korn des Filmes in die vom Tintenschreiber aufgezeichneten Kurven stark ein, was aber die Auswertung der Bewegungsunschärfe bei feinzeichnenden und Universal-Folien nicht beeinträchtigte.

Abbildung 5 zeigt eine solche Kurve. Die Strecke zwischen den beiden senkrechten Strichen entspricht am Röntgenfilm dem Schatten des Objekts. Nehmen wir an, Abbildung 5 stellt den Schatten des 0,6 mm starken Stahldrahtes in Ruhe dar, so würde mit zunehmender Bewegungsunschärfe die Strecke zwischen den beiden senkrechten Strichen immer größer werden und die Kurve sich abflachen.

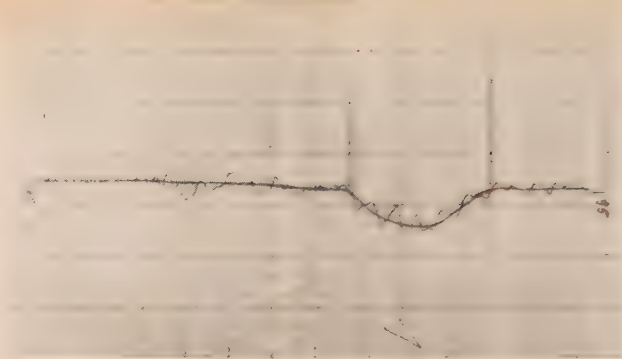


Abb.5. Beispiel für mikrophotometrische Registrierung des Schwärzungsverlaufs.

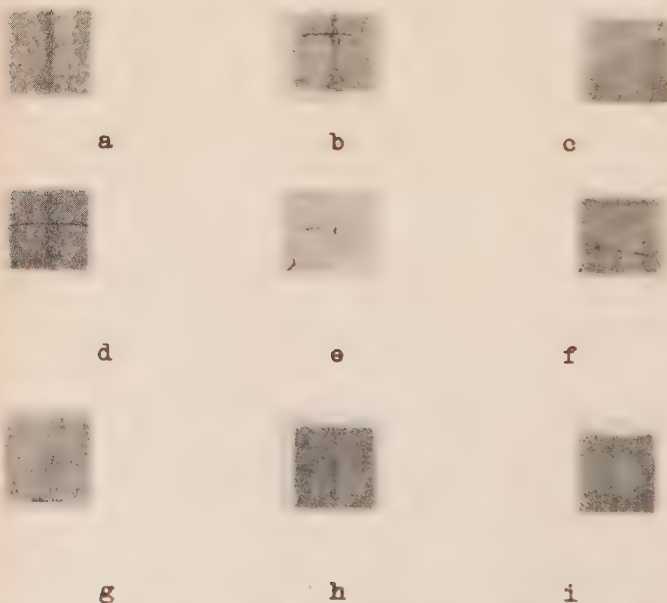


Abb.6. Aufnahmen des Phantoms bei 50mm/sec Geschwindigkeit und 0,01 sec Belichtungszeit für Universalfolien und 2mm^2 Fokus. Die übrigen Belichtungszeiten sind der Folienempfindlichkeit und der Belastbarkeit der Brennflecke angepaßt.

a,d,g: feinz.Folie	a,b,c: 2mm^2 Fokus
b,e,h: Universalfolie	d,e,f: $1,2\text{mm}^2$ Fokus
c,f,i: hochverst. Folie	g,h,i: $0,9\text{mm}^2$ Fokus

IV. Ergebnisse.

Als Maßstab für die Bewegungsunschärfe wurde die Länge der Strecke zwischen den beiden senkrechten Strichen in Millimeter gewählt. (s. Abb. 5) Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen.

Folie	Fokus-Film-Abstand (cm)			Belichtung
	70	103,7	136,5	
Rubin	35	32	29	0,01 sec
	37	34	32	0,02 "
Saphir	33	30	27	0,005 "
	38	35	32	0,01 "
	42	40	37	0,02 "
Diamant				0,005 "
	nicht auswertbar			0,01 "
				0,02 "

Tabelle 1

Bei der in Tabelle 1 gezeigten Auswertung schneidet bei einem Vergleich der Unschärfewerte die Saphirfolie am besten ab. Ebenfalls zeigt sich, daß die kurze Belichtungszeit bei der Diamantfolie die hohe Folienunschärfe nicht wettmachen kann.

Um dieses Ergebnis zu überprüfen, soll eine zweite Auswertung erfolgen und zwar nach der Belastbarkeit der Brennflecke. Nach den Belastungstabellen wurden zu diesem Zweck die Belichtungszeiten für die drei Folienpaare und die drei Brennfleckgrößen 2 mm^2 , $1,2 \text{ mm}^2$ und $0,9 \text{ mm}^2$ errechnet. Die Ergebnisse zeigt Tabelle 2.

Diese Belichtungszeiten wurden nun wieder nach der auf Seite 13 angegebenen Methode für eine Objektgeschwindigkeit von 50 mm/sec für die bereits vorhandenen Röntgenaufnahmen umgerechnet. Diese derart auf den Filmen festgelegten Stellen wurden

wieder mit dem Photometer ausgewertet. Es ergaben sich die gleichen Kurven, wie sie Abbildung 5 zeigt. Die Entfernungen zwischen den beiden senkrechten Strichen sind in der Tabelle 3 zusammengestellt.

Folie	Brennfleckgröße/Fokus-Film-Abstand		
	2/70	1,2/103,7	0,9/136,5
Rubin	0,01 sec	0,017 sec	0,023 sec
Saphir	0,005 sec	0,0085 sec	0,0115 sec
Diamant	0,0025 sec	0,0043 sec	0,00575 sec

Tabelle 2

Folie	Fokus-Film-Abstand		
	70 cm	103,7 cm	136,5 cm
Rubin	35	33	-
Saphir	33	30	28
Diamant	nicht auswertbar		

Tabelle 3

Auch bei dieser Art der Auswertung zeigt sich aus Tabelle 3, daß die Saphirfolie die günstigsten Unschärfewerte liefert.

Um auch bei der Auswertung praxisnahe Bedingungen einzuhalten, wurde als dritte Art der Auswertung die visuelle Betrachtung am Lichtkasten gewählt. Die Röntgenfilme wurden dazu in Masken aus schwarzem Papier gehüllt. Diese Masken gaben nur die auszuwertenden Stellen des Films in Größe von 1 cm frei. Es wurden wieder für jede Brennfleckgröße und jede Verstärkerfolie die Punkte der Filme mit einer Objektgeschwindigkeit von 50 mm/sec untersucht. Die Auswertung nahmen 10 fachkundige Personen vor, die aber die Filme vorher noch nicht gesehen hatten. Es wurden ihnen drei Gruppen zu drei

Filmen vorgelegt (Abbildung 6) und zwar:

1. Gruppe: Filme mit Fokus 2 mm^2 und den drei Folienpaaren,
2. Gruppe: Filme mit Fokus $1,2 \text{ mm}^2$ und den drei Folienpaaren,
3. Gruppe: Filme mit Fokus $0,9 \text{ mm}^2$ und den drei Folienpaaren.

Jede einzelne Person wurde nun unabhängig von den anderen gefragt, welche der drei Aufnahmen aus jeweils einer Gruppe den schärfsten Eindruck vom Objekt vermitteln. Alle zehn Personen gaben an, daß aus jeder Gruppe die mit der Saphirfolie gemachten Aufnahmen am schärfsten seien.

Bei visueller Auswertung zeigt ein Vergleich der mit verschiedenen Brennfleckgrößen und den der Belastbarkeit entsprechenden Belichtungszeiten angefertigten drei Aufnahmen mit Saphirfolien, daß der Schärfegegewinn durch Verringerung der geometrischen Unschärfe bei einem Brennfleck von $1,2 \text{ mm}^2$ gegenüber dem Brennfleck von 2 mm^2 noch die Vergrößerung der Bewegungsunschärfe durch die Verlängerung der Belichtungszeit überwiegt. Bei weiterer Verringerung der Brennfleckgröße auf $0,9 \text{ mm}^2$ ist dagegen unter den von uns gewählten Bedingungen kein Schärfegegewinn mehr feststellbar.

V. Diskussion der Ergebnisse.

Unseren Untersuchungen lag die Absicht zu Grunde, den Einfluß der Bewegungsunschärfe auf die Gesamtunschärfe unter verschiedenen in der Praxis

vorkommenden Bedingungen experimentell zu überprüfen. Da die Bewegungsunschärfe überhaupt nur bei der Erkennung sehr kleiner Einzelheiten eine wichtige Rolle spielt, mußten die Untersuchungsbedingungen hinsichtlich des Detailkontrastes und der Objektgeschwindigkeit bis an die Grenze des praktisch Vorkommenden verschärft werden. Diese Forderung ist nicht übertrieben, da gerade unter solchen Grenzbedingungen in der Praxis feinere Einzelheiten leicht übersehen werden. Die Praxisnähe dieser Untersuchungen macht es auch erforderlich, möglichst viele Variationen der Bedingungen gleichzeitig zu untersuchen. Es würde z. B. nicht den praktischen Gegebenheiten entsprechen, wenn bei allen benutzten Folien die gleiche Belichtungszeit gewählt würde und auch für die verschiedenen Brennfleckgrößen die gleiche Belastbarkeit angenommen würde. Hinsichtlich der Auswertung erschien es uns zweckmäßig, zunächst den Versuch zu unternehmen, objektive Werte durch die mikrophotometrische Ausmessung der Aufnahmen zu erhalten. Wie zu erwarten war, ließ sich dieses Vorhaben nur teilweise durchführen, da das Photometer viel mehr Einzelheiten registriert, als das Auge tatsächlich sieht. Den endgültigen Ausschlag mußte daher die visuelle Auswertung der Aufnahmen geben. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass beide Auswertungsverfahren praktisch zu den gleichen Ergebnissen geführt haben; bemerkenswert war die völlige Übereinstimmung aller Betrachter bei der visuellen Auswertung.

Es zeigte sich, dass weder hinsichtlich der Folienunschärfe noch hinsichtlich der Brennfleckgrößen extreme Anforderungen zweckmäßig sind, wenn es sich um die Darstellung von Organen handelt, bei denen relativ große Bewegungsunschär-

fen in Betracht gezogen werden müssen. So ergab es sich, daß von den drei untersuchten Belegungsstärken der Folien, die mittlere, nämlich die sogenannte Universalfolie (Saphirfolie) und auch von den drei untersuchten Brennfleckgrößen ebenfalls der mittlere ($1,2 \text{ mm}^2$ Fokus) die Aufnahmen mit dem besten Schärfeeindruck lieferten. Dabei ist besonders zu beachten, daß infolge der benützten hohen Aufnahmespannung die der Praxis entsprechenden experimentellen Belichtungszeiten außerordentlich kurz waren. Sie lagen in einer Größenordnung, die, insbesondere bei Benutzung geringerer Spannungen, in der Praxis häufig nicht erreicht werden. Bei längeren Belichtungszeiten muß aber der Einfluß der Bewegungsunschärfe auf die Gesamtunschärfe noch wesentlich größer werden, sodaß hier erst recht keine weitere Erhöhung der Belichtungszeiten durch Verwendung weniger empfindlicher, feinzeichnender Folien oder weniger stark belastbarer Brennflecke in Kauf genommen werden kann. Der Einfluß der Bewegungsunschärfe ist in der Praxis also so groß, daß er oft bei der Untersuchung innerer Organe die Bedeutung anderer Unschärfefaktoren überwiegt.

Wir haben noch den Versuch unternommen, das Ergebnis unserer Untersuchungen durch rein rechnerische Ermittlung der Gesamtunschärfe zu ergänzen. Auch hier (Tabelle 4) zeigte sich der sehr große Einfluß der Bewegungsunschärfe. Alle Unschärferechnungen sind allerdings mit einem erheblichen Unsicherheitsfaktor belastet, da ihnen hinsichtlich der Bestimmung der Folienunschärfe Messungen zu Grunde gelegt werden müssen, für die noch keine wirklich zuverlässigen Methoden entwickelt werden konnten. Aus diesem Grunde muß in Tabelle 4 insbesondere die Unschärferechnung für hochverstärkende Folien sehr kritisch betrachtet werden,

der Meßwert für die Folienunschärfe mit großen Schwärzungskontrasten gewonnen ist und hierdurch gerade bei dicken Folien zu geringe Werte für die Unschärfe resultieren.

Gerade wegen der Schwierigkeiten der Bestimmung der Folienunschärfe ist die von uns benutzte praxisnahe Methode für die Ermittlung der Gesamtunschärfe ohne Zweifel der Berechnung überlegen.

Folie	2 mm ² F	1,2 mm ² F	0,8 mm ² F	0,4 mm ² F
Rubin	U=0,8245	U=0,7105	U=0,6745	U=0,6445
	U=1,4045	U=1,3410	U=1,3140	U=1,2840
Saphir	U=0,6198	U=0,4581	U=0,4045	U=0,3545
	U=0,8276	U=0,7146	U=0,6747	U=0,6447
	U=1,4064	U=1,3426	U=1,3140	U=1,2840
Diamant	U=0,6561	U=0,5061	U=0,4615	U=0,4055
	U=0,8551	U=0,7465	U=0,7165	U=0,6815
	U=1,4228	U=1,3601	U=1,3442	U=1,3142

Tabelle 4

VI. Zusammenfassung.

Der Einfluß der Bewegungsunschärfe auf die Gesamtunschärfe ist in den bisher vorliegenden Untersuchungen im wesentlichen nur rechnerisch ermittelt worden. Aus diesem Grunde sollten experimentelle Untersuchungen über den Einfluß der Bewegungsunschärfe unter praxisnahen Bedingungen vorgenommen werden. Diese Untersuchungen wurden mit einem Phantom ausgeführt, mit dem man die Verhältnisse bei

Magenaufnahmen mit 120 KV reproduzieren konnte. Es wurden mit drei Folienkombinationen (feinzeichnend, universal, hochverstärkend) von einem Stahldraht Röntgenaufnahmen gemacht. Bei den Aufnahmen befand sich das Objekt gegenüber dem Film in einer Drehbewegung, sodaß jeder Punkt der Abbildung des Drahtes einer anderen Winkelgeschwindigkeit entsprach. Es wurden Brennfleckgrößen von 2 mm^2 , $1,2 \text{ mm}^2$ und $0,9 \text{ mm}^2$ berücksichtigt und bei einer Objektgeschwindigkeit von 50 mm/sec Belichtungszeiten von $0,005$, $0,01$ und $0,02 \text{ sec}$ angenommen. Zur Erlangung objektiver Ergebnisse wurden die Röntgenaufnahmen mikrophotometrisch ausgewertet. Zusätzlich erfolgte eine visuelle Auswertung. Diese wurde durch eine weitere Auswertungsreihe ergänzt, bei der die Belichtungszeiten nach der Belastbarkeit der verschiedenen Brennfleckgrößen variiert wurden. Alle drei Auswertungsarten zeigten Übereinstimmung. Es ergab sich, daß Universalfolien und ein $1,2 \text{ mm}^2$ Fokus den besten Schärfeeindruck von bewegten Objekten liefern.

Es erscheint also weder zweckmäßig, durch die Forderung nach sehr kleinen und entsprechend geringer belastbaren Brennflecken die Belichtungszeit zu stark zu verlängern, noch durch hochverstärkende Folien die Bewegungsunschärfe zu Ungunsten der Folienunschärfe auszuschalten.

Es ist auch nicht gerechtfertigt, auf Grund theoretischer Überlegungen die Brennfleckgröße und Folienunschärfe bei gleichzeitiger Verringerung der Belastbarkeit beziehungsweise der Folienempfindlichkeit zu stark zu verkleinern. Auch der umgekehrte Weg, also die Verringerung der Bewegungsunschärfe durch Benutzung großer Brennflecke und dicker Folien ist selbst für die Untersuchung schnell bewegter Objekte nicht geeignet.

VII. Literatur.

1. Bronkhorst, W. : Kontrast und Schärfe im Röntgenbilde. Leipzig 1927.
2. Klasens, H.A. : Measurement and calculation of unsharpness combinations in X-Ray Photography. Philips Res. Rep. 1 (1946) 241.
3. Morgan, R.H. : An analysis of the physical factors controlling the diagnostic quality of roentgen images. Amer. J. Roentgenol. 62 (1949) 870.
4. Frost, D. : Über die Bildunschärfe der Verstärkerfolien und Leuchtschirme. Röntgenblätter 7 (1957) 193.
- 4a. Frost, D. : Über die Bildunschärfe der Verstärkerfolien und Leuchtschirme. Röntgenblätter 8 (1957) 234.
5. Warrenjr., S.R. : Roentgenographic unsharpness of the shadow of a moving object I. Radiology 28 (1937) 450.
6. Bauer, K. : ABC der Röntgentechnik. 3 (1948) 664.
7. Eggert, J. : Einführung in die Röntgenphotographie. 7 (1951) 48.
8. Meidinger, W. : Röntgenphotographie. Berlin 1945.
9. Frantzell, A. : Soft Tissue Radiography. Acta radiol. Suppl. 85 (1951) 31.
10. Schober, H. und C. Klett : Untersuchungen über die Zeichenschärfe von Verstärkerfolien. Röntgenblätter 6 (1953) 214.
11. Schober, H. und C. Klett : Untersuchungen über die Zeichenschärfe von Verstärkerfolien. II. Röntgenblätter 6 (1954) 224.

12. Frommhold, W. : Messungen über die Helligkeit
von Verstärkerfolien.
Röntgenblätter 7 (1954) 33.
13. Pfahnl, A. : Messungen der Unschärfe von
Röntgenfolien.
Röntgenblätter 1 (1956) 20.
14. Nemet, A., W.F.Cox und G.B.Walker. Blurring in
Radiography. Brit. J. Radiol.
19 (1946) 257.
15. Warren jr., S.R.: Roentgenographic unsharpness
of the shadow of a moving object II.
Radiology 34 (1940) 731.
16. Burger, G. : Phantomversuche mit Röntgen-
strahlen. Philips techn. Rdsch.
11 (1949) 295.
17. Stumpf, P., H.H.Weber und G.A.Welz. Röntgen-
kymographische Bewegungslehre
innerer Organe. Leipzig 1936.
18. Starling, E.H.: Überblick über den gegenwärtigen
Stand der Kenntnisse über die
Bewegung und Innervation des Ver-
dauungskanal. Ergebn. Physiol.
1 (1902) 446.
19. Tigerstedt, R.: Physiologie des Kreislaufs.
Berlin 1922.
20. Fleisch, A. : Die Beziehungen zwischen Stamm-
und Astquerschnitt im Arterien-
system. Z. Anat. Entwickl. Gesch.
64 (1922)
21. Bethe, A. und G. v.Bergman. Handbuch der normalen
und pathologischen Physiologie.
VII/2. Berlin 1927.
22. Weitz und Hartmann. Dtsch. Arch. klin. Med.
137 (1921).

Lebenslauf.

Am 18. Februar 1934 wurde ich als Sohn des Chemikers Dipl. Ing. Heinrich Sieber und seiner Ehefrau Gertrud, geb. Suske in Warnsdorf/Sudetenland geboren.

Von 1940 bis 1944 besuchte ich die Volksschule in Warnsdorf. 1944 trat ich in die Oberrealschule in Warnsdorf ein. Im Jahre 1945 wurde ich mit meinen Eltern aus der Heimat vertrieben. Nach fast einjährigem Umherirren fanden wir in Schwabach/Bayern eine neue Heimat. Hier besuchte ich die Oberrealschule weiter und legte 1954 die Reifeprüfung ab.

Im Wintersemester 1954/55 begann ich an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen das Studium der Zahnmedizin. Am 24. Februar 1959 legte ich an der gleichen Universität das Staatsexamen ab.

Herrn Privatdozent Dr. W. F r i k, Leiter der Diagnostischen Röntgenabteilung der Medizinischen Universitätsklinik Erlangen möchte ich für die Überlassung des Themas und für die wertvollen Anregungen bei der Ausführung dieser Arbeit meinen verbindlichsten Dank aussprechen.

